

## El papel de la pendiente y el caudal fluvial en la construcción deltaica de ríos montañosos de caudal estacional

### *The role played by the slope and the fluvial discharge on deltaic built-up processes off mountainous seasonal rivers*

P. Bárcenas (1), L.M. Fernández-Salas (2), J. Macías (1), F.J. Lobo (3), N. López-González (4) & V. Díaz del Río (4)

- (1) Dpto. Análisis Matemático, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga. 29080 Málaga, Spain. E-mail: pbarcenas@uma.es
- (2) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz, 11006 Cádiz, Spain.
- (3) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Universidad de Granada), 18100, Armilla, Granada, Spain.
- (4) Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga, 29640, Fuengirola, Málaga, Spain.

**Abstract:** The construction and evolution of submarine deltaic deposits are influenced by a combination of allogenic and autogenic factors. Numerical simulation of turbidity currents are used to propose a morphodynamic model that quantifies the effect of the slope and river input variations on delta development/construction for the case of mountainous rivers subjected to a seasonal Mediterranean climate, such as those located in the northern shelf of the Alboran Sea. These simulations were performed by using both constant and variable rates of fluvial flows. Both theoretical and real bathymetric profiles were used in the simulations. The results indicate that both the river flow and the depositional basin slope are key features for the development of morpho-stratigraphic features of submarine deltas at different spatial scales.

**Key words:** Numerical modeling, turbidity currents, geomorphology, submarine deltas

## 1. INTRODUCCIÓN

La morfología general y el crecimiento de las cuñas prodeltaicas han sido tradicionalmente interpretadas como el resultado del tipo dominante de transporte sedimentario. Sin embargo, los modelos específicos de procesos genéticos relacionados con corrientes de turbidez son escasos, a pesar de la observación de este tipo de corrientes en cuñas modernas y en depósitos de clinoformas antiguas (Gerber *et al.*, 2008).

Los depósitos deltaicos submarinos desarrollados en la plataforma continental del sureste de la Península Ibérica están asociados a pequeñas y abruptas cuencas de drenaje e influenciados por los aportes fluviales episódicos y de carácter torrencial a causa de la marcada variabilidad estacional (Liquete *et al.*, 2005; Bárcenas *et al.*, 2011, 2015). Uno de los depósitos más importantes es el sistema prodeltaico del río Adra en el cual se centra el presente estudio (Fig. 1). El río Adra, con 51,4 km de longitud y 0,75° de pendiente, drena las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas hacia el Mar de Alborán, a lo largo de una extensión de 750 km<sup>2</sup>. Su cauce natural ha sufrido dos desvíos artificiales, hacia el este en 1872 y hacia el oeste en 1910, cuando se fijó en la posición actual (Jabaloy *et al.*, 2008).

El principal objetivo de este trabajo es proponer un

modelo morfodinámico simple, a través de simulaciones numéricas de modelos de flujos hiperpicnales o turbidíticos, basado en la construcción de cuñas sedimentarias por corrientes turbidíticas. Así mismo, se pretende cuantificar en qué medida factores alogenéticos al sistema deltaico como el caudal fluvial, y factores autogenéticos, como la pendiente de la cuenca receptora, contribuyen a la construcción del sistema deltaico.

## 2. METODOLOGÍA

Las simulaciones numéricas se han basado en un modelo promediado por capas. Este tipo de modelo ha sido utilizado de forma tradicional para la simulación de corrientes hiperpicnales (Parker *et al.*, 1986; Kubo, 2004; Khan *et al.*, 2005; Morales *et al.* 2009, entre otros). El modelo utilizado, *turbidity-HySEA*, ha sido desarrollado por el grupo EDANYA de la Universidad de Málaga. Su descripción detallada, parametrizaciones y configuración utilizada se especifican en Bárcenas (2013), mientras que las propiedades de este modelo junto a otros detalles técnicos sobre su resolución numérica pueden encontrarse en Morales *et al.* (2009).

Las simulaciones se han llevado a cabo durante un periodo de tiempo de 8 días, combinando dos variables principales: el flujo o caudal fluvial (Q) y la pendiente de la cuenca receptora (P). Por un lado, se

han utilizado dos tipos de caudales principales: a) Caudal constante en el tiempo de simulación ( $Q_{cte}$ ) con diferentes flujos utilizados, cuyos valores se encuentran entre  $0,05$  y  $1\text{ m}^3/\text{s}$ , y b) Caudal variable en el tiempo de simulación ( $Q_{vble}$ ) con dos máximos y dos mínimos cada 24 horas ( $0,6\text{ m}^3/\text{s}$  de diferencia de caudal entre ellos y un rango mínimo y máximo de  $0,2$ -  $0,8\text{ m}^3/\text{s}$ ) (Fig. 1a). Por otro lado, se han usado dos tipos de perfiles batimétricos para la simular las pendientes: a) Perfil lineal teórico con pendiente variable ( $PL$ ) (Fig. 1b), y b) Perfiles batimétricos reales ( $PR$ ) trazados frente al cauce natural o antiguo ( $C_{antiguo}$ ) y actual ( $C_{actual}$ ) del Río Adra (Fig. 1c).

Los perfiles batimétricos reales fueron realizados a partir de datos de ecosonda multihaz EM3000 Dual entre  $5$  y  $170\text{ m}$  de profundidad con una cobertura del  $100\%$ . Los datos brutos fueron procesados usando el software Neptune® con una resolución de  $5 \times 5\text{ m}$ .

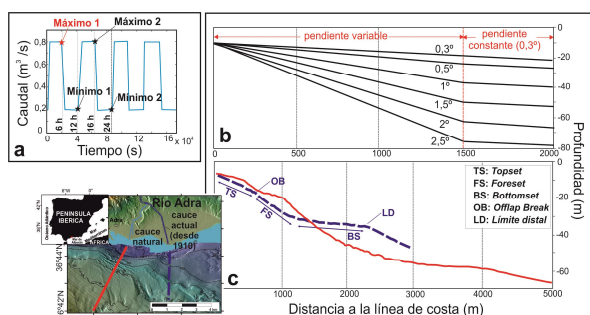


Fig. 1. Tipo de caudal variable y perfiles batimétricos utilizados en las simulaciones. a) Caudal variable, b) Perfil lineal con pendiente variable en los primeros  $1500\text{ m}$  y constante el resto del perfil y, c) Perfiles reales asociados al Río Adra. Se indican los distintos dominios morfológicos del perfil asociado a la cuña prodeltaica frente al cauce actual. En el mapa se muestra la posición de los perfiles y la situación geográfica del área de estudio.

Sobre las  $72$  simulaciones realizadas se han medido  $6$  parámetros morfológicos que definen las cuñas prodeltaicas: a) tiempo necesario para la formación del topset ( $TS_{time}$ ), b) pendiente de la cuña prodeltaica en desarrollo necesaria para la formación del topset ( $P_{TS}$ ), c) pendiente de la cuña prodeltaica en desarrollo necesaria para la formación del topset sin valores extremos ( $P_{TS-nex}$ ), d) distancia del offlap-break a la línea de costa ( $OB_{dist}$ ), e) profundidad del límite distal ( $LD_{depth}$ ) y f) distancia del límite distal a la línea de costa o longitud del prodelta ( $L$ ). Asimismo, se han cuantificado los valores para el análisis de la influencia de  $P$  y  $Q$  sobre dichos parámetros.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Simulaciones sobre perfiles lineales teóricos con pendiente variable

De manera general, en las simulaciones realizadas sobre este tipo de perfiles y con caudales constantes en el tiempo, se observa que  $TS_{time}$  se incrementa a medida que aumenta la pendiente y disminuye el caudal (Fig. 2a).  $P_{TS}$  varía entre  $1$ - $2^\circ$ , excepto para

pendientes abruptas ( $2,5^\circ$ ) y caudales pequeños ( $0,2\text{ m}^3/\text{s}$ ) (Fig. 2b), mientras que  $P_{TS-nex}$  permanece constante con la variación del caudal (Fig. 2c).  $OB_{dist}$  disminuye con el aumento de la pendiente del perfil inicial y/o la disminución del caudal. Para  $P > 1,5^\circ$  son necesarios caudales cada vez más altos para observar OB más alejados de costa (Fig. 2d), mientras que para  $P < 1,5^\circ$  y caudales moderados, el OB se forma muy cerca de la desembocadura.  $LD_{depth}$  aumenta linealmente con la pendiente y exponencialmente con el caudal (Fig. 2e). Se observa un crecimiento lineal de  $L$  con respecto a ambas variables ( $Q$  y  $P$ ) (Fig. 2f). Los perfiles de las cuñas formadas presentan un foreset que se ajusta a una ecuación lineal, con un topset prácticamente plano y un OB abrupto. Respecto a la estructuración interna de las cuñas sedimentarias, se percibe que la separación entre las isocronas es mayor al aumentar el caudal y la pendiente. Por último, indicar que a partir de  $P \geq 1,5^\circ$  y  $Q > 0,35\text{ m}^3/\text{s}$  se observa el efecto erosivo de los flujos simulados, comenzando la erosión del fondo inicial más cerca de la costa al aumentar el caudal.

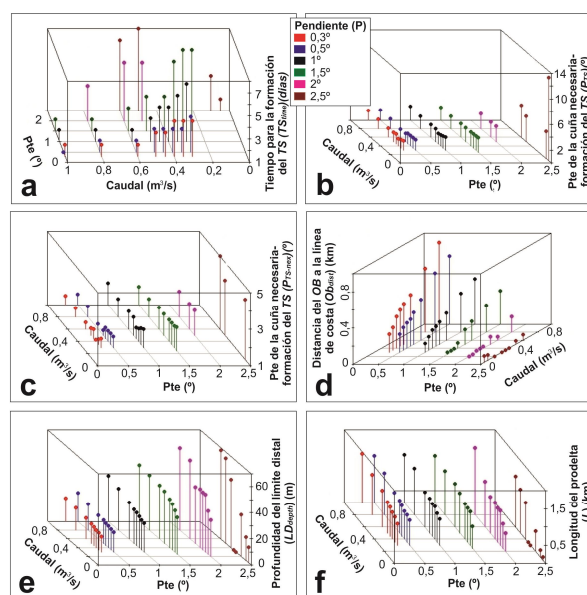


Fig. 2. Diagramas 3D de puntos que muestran la relación existente entre la pendiente de la cuenca receptora ( $P$ ) y el caudal fluvial ( $Q$ ) con los diferentes parámetros morfológicos medidos en las simulaciones de las cuñas prodeltaicas. TS: topset; OB: offlap-break.

En las simulaciones realizadas con caudales variables en el tiempo se advierte que  $TS_{time}$  aumenta con la pendiente, excepto para  $P > 2,5^\circ$ , donde el topset no llega a desarrollarse.  $P_{TS}$  y  $LD_{depth}$  incrementan con el aumento de la pendiente. Opuestamente,  $OB_{dist}$  y  $L$  disminuyen a medida que aumenta la pendiente inicial. En momentos de caudales máximos, se observa que el perfil de la cuña formada es más ondulado y el OB presenta un cambio más abrupto, mientras que en momentos de caudales mínimos, tanto el perfil de la cuña como la configuración del OB son más suaves. Las isocronas muestran menor

separación a medida que aumenta la pendiente. Por último, se observa la existencia de erosión del fondo inicial para  $P \geq 1,5^\circ$  aumentando a medida que se incrementa la pendiente.

### 3.2 Simulaciones sobre perfiles reales

En las simulaciones realizadas con caudales constantes en el tiempo (Fig. 3a-f) se ha observado que  $OB_{dist}$ ,  $LD_{depth}$  y  $L$  aumentan con el incremento de  $Q$ . A medida que avanza el tiempo de simulación, la progradación de las cuñas sedimentarias disminuye, observándose una menor separación en las isocronas. En los primeros días, se advierte la existencia de erosión del fondo inicial. Esta erosión comienza a producirse a partir del punto de inflexión u *offlap break* (Fig. 3). La geometría de la nueva cuña generada evoluciona desde un perfil con forma planar a cóncavo, aunque se observa que para los mayores caudales se produce una convexidad en la parte media del *foreset*, dando lugar a un perfil con geometría sigmoidal.

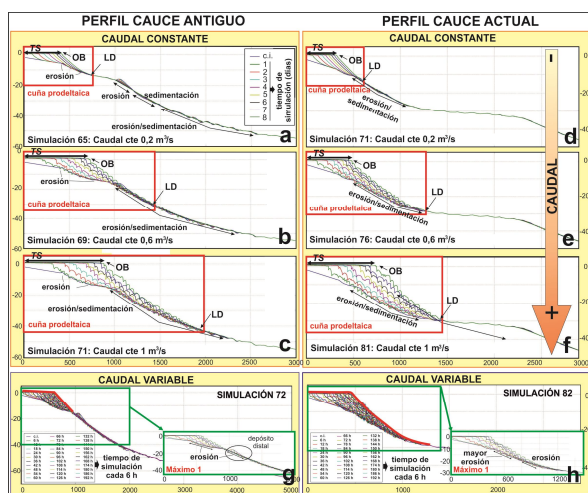


Fig. 3. Ejemplos de las simulaciones realizadas sobre los perfiles reales trazados frente al cauce antiguo y actual de Río Adra, tanto para caudales constantes (a-f) como para caudales variables (g-h). El zoom en g y h muestra la simulación del máximo 1 en los 8 días de simulación. Eje x: distancia a la costa (m); eje y: profundidad (m). TS: topset; OB: offlap break; LD: Límite distal; c.i.: fondo inicial.

En las simulaciones con caudales variables en el tiempo ( $0,2-0,8\text{ m}^3/\text{s}$ ) (Fig. 3g-h) se advierte que los valores de  $OB_{dist}$ ,  $LD_{depth}$  y  $L$  son menores que en las simulaciones con caudales del mismo rango pero constantes en el tiempo. Comparando los resultados de las simulaciones realizadas en ambos perfiles, se observa que, tanto  $L$  como  $LD_{depth}$  son mayores en el situado frente al  $C_{actual}$ , presentando un comportamiento contrario la  $OB_{dist}$ . Respecto a la geometría de las nuevas cuñas, la generada frente al  $C_{antiguo}$  presenta un perfil lineal o ligeramente cóncavo, mientras que la asociada al  $C_{actual}$  muestra una geometría sigmoidal con una somerización del OB de la cuña que se está formando. La erosión del perfil

original es más patente en el perfil frente al  $C_{actual}$ , agudizándose en el OB o cambio de pendiente.

## 4. DISCUSIÓN

La respuesta del sistema deltaico a las variaciones del caudal de descarga de los ríos y de la pendiente de la cuenca receptora incluye cambios de: a) la distancia del OB a la costa, b) la pendiente del *foreset*, c) el espesor sedimentario, d) la tasa de progradación, e) el poder erosivo de los flujos de sedimentos, f) la profundidad del límite distal y g) la formación de los diferentes dominios morfológicos (*topset*, *foreset* y *bottomset*). Las simulaciones realizadas demuestran la relación no lineal entre los factores utilizados como variables ( $Q$  y  $P$ ) y la respuesta de los parámetros morfológicos cuantificados.

La morfodinámica de las cuñas sedimentarias considerando la dispersión del sedimento y la  $OB_{dist}$  puede quedar representada por dos casos extremos y, entre ellos, multitud de casos intermedios (Fig. 4). El primer caso estaría condicionado por una sedimentación proximal (Fig. 4a), y el segundo, la sedimentación está dominada por la dispersión, distribuyéndose los sedimentos por toda la cuenca receptora (Fig. 4f). Este avance de la sedimentación hacia la cuenca, se podría aproximar a un balance del espacio de acomodación ( $A$ ) y el aporte sedimentario ( $S$ ), de forma que cuando: 1)  $A/S > 1$  existiría una transgresión y los depósitos retrogradarían; 2)  $A/S < 1$  se trataría de una regresión, y se produciría la progradación del sistema hacia la cuenca; y 3)  $A/S = 1$ , existiría una agradación vertical de los depósitos. Si aplicamos estas reglas a cada una de las simulaciones realizadas se deduce que: a)  $Q$  y  $P$  influyen en el avance de las cuñas hacia la cuenca, aproximándose a un balance de  $A$  y  $S$ , y b) que las simulaciones sugieren un  $A/S < 1$ , excepto para valores de  $P$  y  $Q$  altos, donde se produce una agradación vertical.

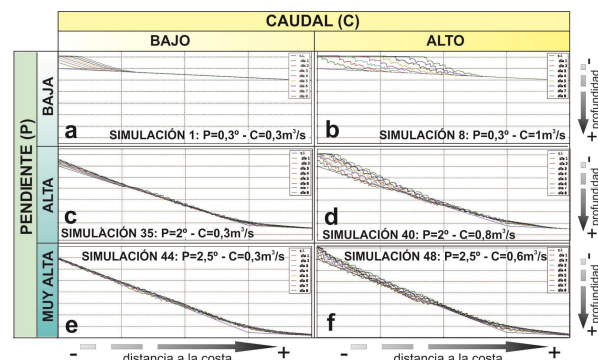


Fig. 4. Contribución del caudal fluvial y de la pendiente de la cuenca receptora a la construcción del sistema deltaico. a-f) Ejemplos de simulaciones para diferentes valores de  $Q$  y  $P$ .

Por otro lado, la pendiente del *foreset* está controlada principalmente por la pendiente, observándose que para valores iguales de  $Q$ , la pendiente del *foreset* aumenta a medida que aumenta  $P$ . En el caso donde

la pendiente es demasiado abrupta, como ocurre en prodeltas del sureste de la Península Ibérica (Bárceñas *et al.*, 2015) con  $P \geq 2,5^\circ$ , se observa, en algunos de ellos, la construcción de un depósito en la base de dicha pendiente hasta que se alcanza un perfil de equilibrio, y a partir de entonces se inicia la progradación de la cuña (Fig. 4f).

Hay que indicar que el OB en todas las simulaciones es abrupto, y no existe variabilidad en este elemento morfológico. Esto se podría explicar por el control que ejerce el oleaje sobre dicho parámetro (Friedrich & Wright, 2004). En el modelo matemático implementado para las simulaciones, este proceso físico no ha sido considerado. Los perfiles obtenidos en las simulaciones pueden ser lineales o cóncavos donde la tasa de sedimentación en el OB se ve favorecida alcanzando valores máximos en este punto, disminuyendo de forma constante con el tiempo para el caso de los perfiles lineales, y decreciendo de forma logarítmica, para los cóncavos. Si el OB fuese suave, provocaría una tasa de sedimentación más gradual, y favorecería la formación de perfiles sigmoidales.

Según las simulaciones realizadas, el retrabajamiento o erosión en el fondo de la cuenca receptora está más influenciada por Q que por P. Por tanto, la existencia de morfologías erosivas sobre las cuñas prodeltaicas, como por ejemplo canales, puede ser propia de zonas de alto aporte, aunque la pendiente no sea muy elevada.

La ciclicidad del aporte sedimentario, que funciona como un proceso alocíclico, controla la morfología de la cuña y modula en cierto sentido su construcción, siendo los valores mínimos del aporte sedimentario los que parecen controlar la progradación. Esto permite asignar a las condiciones locales de aportes mínimos un papel relevante tanto en el control de la progradación como en la distancia a la costa del límite distal.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que tanto el caudal como la pendiente de la cuenca receptora tienen un papel clave en el desarrollo de las cuñas prodeltaicas, tanto a escala de depósito como de morfologías menores. Por otro lado, los modelos de flujos hiperpícnos han demostrado ser una herramienta útil para el desarrollo de este trabajo, y han proporcionado una información muy valiosa sobre las variables más determinantes en la formación y evolución de los sistemas prodeltaicos.

## Agradecimientos

Este trabajo representa una contribución a los Proyectos de Excelencia MOSAICO (P06-RNM-01594) y TESELA (P11-787 RNM7069). Los datos batimétricos fueron obtenidos en el proyecto ESPACE llevado a cabo por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) y la Secretaría General de Pesca Marítima. Agradecemos a la Agencia Andaluza del Agua la cesión de los datos del caudal del Río Adra.

## REFERENCIAS

- Bárceñas, P. (2013). Procesos morfogenéticos y evolución reciente de los depósitos prodeltaicos del sureste de la Península Ibérica: Aplicaciones de modelos matemáticos. *Ph. D. Thesis*, Universidad de Málaga, Málaga, 410 pp.
- Bárceñas, P., Lobo, F.J., Macías, J., Fernández-Salas, L.M. & Díaz del Río, V. (2011). Spatial variability of surficial sediments on the northern shelf of the Alboran Sea: the effects of hydrodynamic forcing and supply of sediment by rivers. *Journal Iberian of Geology*, 37, 195–214.
- Bárceñas, P., Lobo, F.J., Macías, J., Fernández-Salas, L.M., López-González, N. & Díaz del Río, V. (2015) Submarine deltaic geometries linked to steep, mountainous drainage basins in the northern shelf of the Alboran Sea: Filling the gaps in the spectrum of deltaic deposition. *Geomorphology*, 232, 125–144.
- Friedrichs, C.T. & Wright, L.D. (2004). Gravity-driven sediment transport on the continental shelf: Implications for equilibrium profiles near river mouths. *Coastal Engineering*, 51, 795–811.
- Gerber, T.P., Pratson, L.F., Wolinsky, M.A., Steel, R., Mohr, J., Swenson, J.B. & Paola, C. (2008). Cliniform progradation by turbidity currents: Modeling and experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 78, 220–238.
- Jabaloy-Sánchez, A., Lobo, F.J., Azor, A., Bárceñas, P., Fernández-Salas, L.M., Díaz del Río, V. & Pérez-Peña, J.V. (2010). Human-driven coastline changes in the Adra River deltaic system, southeast Spain. *Geomorphology*, 119, 9–22.
- Khan, S.M., Imran, J., Bradford, S. & Syvitski, J.P.M. (2005). Numerical modeling of hyperpycnal plume. *Marine Geology*, 223, 193–211.
- Kubo, Y., Soh, W., Machiyama, H. & Tokuyama, H. (2004). Bedforms produced by the Kuroshio Current passing over the northern Izu Ridge. *Geo-Marine Letters*, 24, 1–7.
- Liquete, C., Arnau, P., Canals, M. & Colas, S. (2005). Mediterranean river systems of Andalusia, southern Spain, and associated deltas: a source to sink approach. *Marine Geology*, 222–223, 471–495.
- Morales, T., Castro, M.J., Parés, C. & Fernández, E.D. (2009). On a shallow water model for the simulation of turbidity currents. *Commun. Comput. Phys.*, 9, 848–882.
- Parker, G., Fukushima, Y. & Pantin, H.M. Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 171, 145–181.